

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03862

研究課題名(和文) Interstellar Turbulence by Supermassive Black-Hole Jets, Winds, and Radiation

研究課題名(英文) Interstellar Turbulence by Supermassive Black-Hole Jets, Winds, and Radiation

研究代表者

Wagner Alexander (WAGNER, Alexander)

筑波大学・計算科学研究センター・助教

研究者番号：20634463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：銀河が衝突・合体し、星間ガスから多くの星が生まれることで銀河は成長していく。銀河の中心のブラックホールは時折、ジェットを放出し、銀河内の星の形成速度を変化させる。この現象は、銀河と中心ブラックホールの共進化における重要なプロセスであるが、よく理解されていない。従来は、ジェットがガスを吹き飛ばし、星形成を一時的に停止させると考えられていたが、そのためには高いジェットパワーが十分な頻度で発生する必要がある。本研究では、3次元高解像度シミュレーションを用いて、低出力ジェットでも有効な新しいフィードバック過程を発見した。それは、ジェットが星間ガスの乱流を誘発し、銀河の星形成に影響するというものです。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Our discovery that supermassive black holes at the center of galaxies can affect the turbulent galactic gas dynamics through jets has not been appreciated or investigated prior to our work. Our models have direct implications for the understanding of how, when and where stars in a galaxy are born.

研究成果の概要(英文)：Over cosmic time, galaxies grow as more stars form from interstellar gas, and as galaxies collide and merge. At the center of each galaxy is a black hole that also grows as it accretes interstellar gas, stars, and other black holes. The black holes occasionally emit extremely powerful jets that impact the gas in the galaxy and changes the rate at which stars form in the galaxy. This phenomenon, termed active galactic nucleus feedback, is an important process in the coordinated evolution of galaxy and central black hole, which is not well understood. Conventionally, it was thought that the jets drive out gas which temporarily halts star-formation. However, this requires high jet powers occurring often enough to be effective. We have, through our work using 3D high-resolution simulations, discovered a new mode of feedback which is effective also for low-powered jet: the jets induce and modify the turbulence in the interstellar gas which affects the star-formation in the galaxy.

研究分野：Astrophysics

キーワード：galaxy evolution HPC supermassive black holes interstellar medium relativistic jets turbulence CFD

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

The current universe is filled with galaxies with an immense diversity of sizes, masses, morphologies, stellar content, and interstellar matter. The galaxies formed at different epochs and with different stars, colliding and merging, and producing more and more stars from interstellar gas. Galaxy formation and star-formation would be runaway gravitational processes were it not for galactic scale outflows driven by jets and radiation from the supermassive black holes (SMBH) that exists at the center of every galaxy. This SMBH “feedback” process was thought to be the primary mechanism by which SMBH control the star formation in a galaxy, as implied by the tight relationship between black hole mass and galaxy bulge velocity dispersion, called the $M-\sigma$ relation, and the co-evolutionary growth of SMBH and galaxy as evidenced by evolution of the SMBH accretion rate and star-formation rate over cosmic time.

Observations and simulations have shown, however, that driving sufficiently strong outflows of molecular gas – the source of star formation – through SMBH jets is not an easy feat because the molecular clouds are very dense and they compactify into clumps when hit and compressed by diffuse fast-flowing jet plasma. A complete theory of jet-mediated SMBH feedback has been eluding astrophysicists.

2. 研究の目的

Our group has been at the forefront of performing simulations of SMBH jet feedback and, for the reasons stated in §1, we saw the need to investigate a new channel of feedback that occurred to us: the modification of turbulence in molecular clouds through interactions with jets. This theory has never been posited or explored before, but it is a strongly motivated hypothesis because star-formation in molecular clouds is known to be regulated by the turbulence; if SMBH jets can modify molecular cloud turbulence, they can control the star-formation rate in the galaxy. An attractive feature of this hypothesis is that it may work very well even for low-powered jets, which fail to launch outflows.

The aim of this project was, therefore, to examine the possibility that, instead of driving outflows, the jets precipitate and modify the turbulence of the interstellar gas, which, in turn, affects the star-formation rate.

3. 研究の方法

The objectives to reach the aims in §2 were to conduct a series of high-resolution relativistic magnetohydrodynamic simulations of jets interacting with a galactic disc containing clumpy dense interstellar gas, representing molecular clouds, and to compare these with observations of galaxies in which jet feedback appears to be operating without creating massive outflows. The steps included:

1. Construct initial conditions of a magnetized two-phase interstellar medium and magnetized jet;
2. Perform simulations with the magneto-hydrodynamical code PLUTO;
3. Analyze magneto-hydrodynamical simulations in terms of how jets modify thermodynamics and the turbulence in the interstellar medium; and
4. Compare analysis results with new observations of galaxies hosting young jets.

4. 研究成果

The main outcome of this research was summarized in the papers Meenakshi et al. (2022a,b), Mandal et al. (2021), Nesvadba et al. (2021), Murthy et al. (2022), and Audibert et al. (2023).

Our simulations and analysis showed that SMBH jets affect the star-forming gas in galaxies in ways that radiation cannot (Meenakshi et al., 2022a) and in much more dynamically

complicated ways than previously known (Meenakshi et al., 2022b; Mandal et al., 2021). The key new insights gleaned were as follows:

1. Shocks driven by jets are much more effective in ionizing dense, star-forming gas than radiation from SMBH accretion discs (Meenakshi et al., 2022a).
2. We have discovered that plasma percolating through the porous interstellar medium compress and disperse clouds in a manner that modifies the turbulence within. This has profound effects on when, where, how many, and how fast stars form in the galaxy (Mandal et al., 2021). This is a novel, distinct form of feedback by SMBH that has never before investigated theoretically in the literature.
3. The new theory of SMBH jet-regulated turbulence appears to be operating in the radio galaxy J2345-0449, which, through our investigations comparing simulations and new ALMA data, is turning into a prime example of this new, efficient mode of feedback.
4. We have discovered new signatures of jet feedback in galactic discs for inclined jets (Meenakshi et al., 2022a), including a chimney effect - which we are beginning to see and understand in new observations with state-of-the-art telescopes (MUSE on VLT, ALMA Murthy et al., 2022; Audibert et al., 2023).

These new insights have changed our understanding of how the regulation of star-formation by SMBH jets operates. Outflows are only a part of the picture, and gas ionization and the modification of turbulence in the interstellar clouds are likely crucial mechanisms in how run-away star-formation is prevented in galaxies.

The discovery of this completely independent channel of SMBH feedback through the precipitation of turbulence may be the beginning of a paradigm shift in one of the pillars of galaxy formation theory: the co-evolution of SMBH and galaxies through cosmic time through SMBH feedback. The traditional view that jet-driven outflows are responsible for regulating star-formation and, thereby, ensuring co-evolution, needs to be updated to include the effects of jet-mediated turbulent regulation of star-formation.

Furthermore, the newly discovered effect needs, therefore, also to be included in large-scale cosmological simulations that attempt to simulate a representative section of the universe and obtain statistical predictions of galaxy properties, an endeavor pursued by some of the biggest theoretical astrophysics groups in the world. The results from our project provide valuable input into the SMBH and galaxy physics that these simulations do not resolve.

参考文献

- Audibert, A., Ramos Almeida, C., García-Burillo, S., et al. 2023, *A&A*, 671, L12
Mandal, A., Mukherjee, D., Federrath, C., et al. 2021, *MNRAS*, 508, 4738
Meenakshi, M., Mukherjee, D., Wagner, A. Y., et al. 2022a, *MNRAS*, 511, 1622
Mukherjee, D., Wagner, A. Y., et al. 2022b, *MNRAS*, 516, 766
Murthy, S., Morganti, R., Wagner, A. Y., et al. 2022, *Nature Astronomy*, 6, 488
Nesvadba, N. P. H., Wagner, A. Y., Mukherjee, D., et al. 2021, *A&A*, 654, A8

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Murthy Suma, Morganti Raffaella, Wagner Alexander Y., Oosterloo Tom, Guillard Pierre, Mukherjee Dipanjan, Bicknell Geoffrey	4. 巻 6
2. 論文標題 Cold gas removal from the centre of a galaxy by a low-luminosity jet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 488 ~ 495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01596-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mandal Ankush, Mukherjee Dipanjan, Federrath Christoph, Nesvadba Nicole P H, Bicknell Geoffrey V, Wagner Alexander Y, Meenakshi Moun	4. 巻 508
2. 論文標題 Impact of relativistic jets on the star formation rate: a turbulence-regulated framework	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4738 ~ 4757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2822	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Medling Anne M., Kewley Lisa J., Calzetti Daniela, Privon George C., Larson Kirsten, Rich Jeffrey A., Armus Lee, Allen Mark G., Bicknell Geoffrey V., Diaz-Santos Tanio, Heckman Timothy M., Leitherer Claus, Max Claire E., Rupke David S. N., Treister Ezequiel, Messias Hugo, Wagner Alexander Y.	4. 巻 923
2. 論文標題 Tracing the Ionization Structure of the Shocked Filaments of NGC 6240	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 160 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2ebb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Cecil Gerald, Wagner Alexander Y., Bland-Hawthorn Joss, Bicknell Geoffrey V., Mukherjee Dipanjan	4. 巻 922
2. 論文標題 Tracing the Milky Way 's Vestigial Nuclear Jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 254 ~ 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac224f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ichikawa Kohei, Yamashita Takuji, Toba Yoshiki, Nagao Tohru, Inayoshi Kohei, Charisi Maria, He Wanqiu, Wagner Alexander Y., et al.	4. 巻 921
2. 論文標題 A Wide and Deep Exploration of Radio Galaxies with Subaru HSC (WERGS). IV. Rapidly Growing (Super)Massive Black Holes in Extremely Radio-loud Galaxies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 51 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1b26	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mukherjee Dipanjan, Bicknell Geoffrey V., Wagner Alexander Y.	4. 巻 342
2. 論文標題 Resolved simulations of jet ISM interaction: Implications for gas dynamics and star formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomische Nachrichten	6. 最初と最後の頁 1140 ~ 1145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asna.20210061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Banda-Barragan W E, Bruggen M, Heesen V, Scannapieco E, Cottle J, Federrath C, Wagner A Y	4. 巻 506
2. 論文標題 Shock-multicloud interactions in galactic outflows II. Radiative fractal clouds and cold gas thermodynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5658 ~ 5680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nesvadba N. P. H., Wagner A. Y., Mukherjee D., Mandal A., Janssen R. M. J., Zovaro H., Neumayer N., Bagchi J., Bicknell G.	4. 巻 654
2. 論文標題 Jet-driven AGN feedback on molecular gas and low star-formation efficiency in a massive local spiral galaxy with a bright X-ray halo	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A8 ~ A8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202140544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Keisuke, Miyamoto Yusuke, Kuno Nario, Salak Dragan, Wagner Alexander Y, Seta Masumichi, Nakai Naomasa	4. 巻 73
2. 論文標題 Relating gas dynamics to star formation in the central region of the barred spiral galaxy NGC 613	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1019 ~ 1035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nesvadba N. P. H., Bicknell G. V., Mukherjee D., Wagner A. Y.	4. 巻 639
2. 論文標題 Gas, dust, and star formation in the positive AGN feedback candidate 4C 41.17 at $z = 3.8$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L13 ~ L13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202038269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Banda-Barragan W E, Bruggen M, Federrath C, Wagner A Y, Scannapieco E, Cottle J	4. 巻 499
2. 論文標題 Shock-multicloud interactions in galactic outflows I. Cloud layers with lognormal density distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2173 ~ 2195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zovaro Henry R M, Sharp Robert, Nesvadba Nicole P H, Kewley Lisa, Sutherland Ralph, Taylor Philip, Groves Brent, Wagner Alexander Y, Mukherjee Dipanjan, Bicknell Geoffrey V	4. 巻 499
2. 論文標題 Unravelling the enigmatic ISM conditions in Minkowski 's object	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4940 ~ 4960
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zovaro Henry R M, Nesvadba Nicole P H, Sharp Robert, Bicknell Geoffrey V, Groves Brent, Mukherjee Dipanjan, Wagner Alexander Y	4. 巻 489
2. 論文標題 Searching for signs of jet-driven negative feedback in the nearby radio galaxy UGC 05771	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4944 ~ 4961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murthy Suma, Morganti Raffaella, Oosterloo Tom, Schulz Robert, Mukherjee Dipanjan, Wagner Alexander Y, Bicknell Geoffrey, Prandoni Isabella, Shulevski Aleksandar	4. 巻 629
2. 論文標題 Feedback from low-luminosity radio galaxies: B2 0258+35	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A58 ~ A58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935931	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Banda-Barragan W E, Zertuche F J, Federrath C, Del Valle J Garcia, Bruggen M, Wagner A Y	4. 巻 486
2. 論文標題 On the dynamics and survival of fractal clouds in galactic winds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4526 ~ 4544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zovaro Henry R M, Sharp Robert, Nesvadba Nicole P H, Bicknell Geoffrey V, Mukherjee Dipanjan, Wagner Alexander Y, Groves Brent, Krishna Shreyam	4. 巻 484
2. 論文標題 Jets blowing bubbles in the young radio galaxy 4C 31.04	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3393 ~ 3409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Kpc-scale AGN Feedback
3. 学会等名 多重AGNサイエンスワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Exploring the regulation of star-formation through AGN-jet-driven turbulence
3. 学会等名 銀河星形成研究会 2021 (Galactic Star Formation 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Galaxy-scale AGN Feedback
3. 学会等名 超巨大ブラックホール研究会：その実態・影響・起源の全貌解明に向けて
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Mechanical AGN feedback: radio-mode IGM and kpc-scale ISM interactions
3. 学会等名 ALMA workshop 2021 "Cold outflows near and far: crossroads of our current understanding" (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Probing jet-ISM interactions and the physics of AGN feedback in the radio galaxy IC 5063 with source-tailored hydrodynamic simulations
3. 学会等名 IAU Symposium 362 "The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool" (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dipanjan Mukherjee、Wagner Alexander、Bicknell Geoffrey
2. 発表標題 Simulating the jet-ISM interaction in GPS & CSS galaxies
3. 学会等名 6th Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum Radio Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Cecil Gerald N, Wagner Alexander Y, Bland-Hawthorn J
2. 発表標題 Tracing the Vestigial Milky Way Jet
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Jet-ISM interactions in gas rich disc galaxies
3. 学会等名 European Week of Astronomy and Space Science 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Simulations of AGN Feedback by relativistic jets in disc galaxies
3. 学会等名 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第6回ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wagner Alexander
2. 発表標題 Galaxy Formation and AGN Feedback
3. 学会等名 宇宙史研究センター・シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>MWAGN: The Milky Way Supermassive Black Hole Jet https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ayw/research/mwagn/ Research on AGN Feedback https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ayw/research/research.html pyFC A fractal cube construction module https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ayw/code/pyFC/ Personal webpage https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ayw/pyFC-A-fractal-cube-generator https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/ayw/code/pyFC/index.html 筑波大学 計算科学研究センター 宇宙物理理論研究室 研究成果 https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/achievements/ja/</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------